

DESEMPENHO MECÂNICO DE ALVENARIA DE BTC ESTABILIZADOS ATRAVÉS DA ATIVAÇÃO ALCALINA DE CINZAS VOLANTES

MECHANICAL PERFORMANCE OF MASONRY MADE WITH CEB STABILISED BY ALKALI ACTIVATED FLY ASHES

Soares, Edgar; *ISISE - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, edgarsoares@civil.uminho.pt*
Silva, Rui A.; *ISISE - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, ruisilva@civil.uminho.pt*
Miranda, Tiago; *ISISE - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, tmiranda@civil.uminho.pt*
Oliveira, Daniel V.; *ISISE - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, danvco@civil.uminho.pt*
Leitão, Dinis; *C-TAC - Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, dleitao@civil.uminho.pt*
Cristelo, Nuno; *CQVR - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, ncristel@utad.pt*
Oliveira, Juliana; *Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, juvieira16@gmail.com*

RESUMO

Ao longo dos últimos anos foi possível observar uma crescente preocupação ao nível da sustentabilidade e da preservação do meio ambiente. Este trabalho tem como principal objetivo prestar um contributo nesse sentido, nomeadamente através do desenvolvimento de um material mais sustentável, com menor impacto ambiental, recorrendo a uma técnica que permite encarar os resíduos industriais como matérias-primas. A terra, como material de construção, tem já uma utilização milenar, comprovada pelos importantes monumentos que chegaram até aos nossos dias. A ativação alcalina, enquanto técnica para a produção de ligantes alternativos, tem demonstrado um grande potencial, evidenciado ao longo dos últimos anos. Através da utilização de solo e da ativação alcalina de cinzas volantes foi possível desenvolver um material para fabrico de blocos de terra compactada (BTC) com desempenho mecânico, quer a nível individual quer ao nível da própria alvenaria resultante, adequado ao funcionamento deste tipo de estrutura.

ABSTRACT

Over the last years it was possible to observe an increasing concern in terms of sustainability and environmental preservation. This work aims to make a contribution in this direction, particularly through the development of a more sustainable material, with lower environmental impact, employing a technique that allows to face the industrial waste as raw materials. The earth as building material has a millenary use, proven by the important monuments that have survived till nowadays. The alkaline activation, while technique for the production of alternative binders, has shown a great potential, evidenced over the last years. Through the use of the soil and alkali activated fly ashes was possible to develop a material for the manufacture of compressed earth blocks (CEB) with mechanical performance, either individually or at the level of the masonry itself, suitable for use in this type of structure.

1 - INTRODUÇÃO

Os blocos de terra compactada (BTC) constituem uma evolução natural dos adobes, em que a produção dos blocos passa a ser realizada por meios mecânicos, através da compactação da terra em moldes. As primeiras experiências com vista à sua aplicação foram efetuadas na Europa, no início do século XIX. A terra húmida era colocada num molde de madeira e comprimida com os pés. Anos depois, em 1950, surgiu na Colômbia a primeira máquina de produção de BTC, denominada CINVA-ram (Houben e Guillaud, 2008; Jaquin e Augarde, 2012). A técnica construtiva com BTC é atualmente das mais utilizadas no âmbito da construção em terra. Graças à maior eficiência na diminuição do volume de vazios, esta técnica permite aumentar consideravelmente a resistência mecânica dos blocos. Além disso, na construção em terra com BTC é possível um maior controlo da qualidade de produção, já que o processo é mais industrializável (Silva et al., 2015), através da utilização de prensas hidráulicas (Doat et al., 1996). Estas unidades podem ser utilizadas como estrutura portante ou servir de enchimento de uma estrutura porticada de madeira ou betão armado. A utilização de argamassas de assentamento pode ser reduzida ou mesmo eliminada, uma vez que os BTC apresentam a possibilidade de serem moldados em diversas formas, tornando-os encaixáveis (Torgal e Jalali, 2011).

Partilhando as vantagens normalmente associadas à construção em terra, é possível destacar outras características que fazem com que esta técnica seja uma das formas de construir em terra com maior potencialidade (Adam e Agib, 2001): (i) baixo custo de produção, possibilidade de utilizar matéria-prima existente no local e mão-de-obra semiquificada; (ii) facilmente adaptável às diversas necessidades técnicas, sociais e hábitos culturais; (iii) tecnologia de fácil aprendizagem; (iv) equipamento pouco complexo, constituído por prensas manuais ou hidráulicas, permitindo adaptação às necessidades de

produção; (v) versatilidade ao nível do controlo do produto final, permitindo diversos tipos de acabamento sem prejuízo da qualidade e regularidade.

O solo normalmente utilizado no fabrico de BTC é constituído por partículas de tamanho variável, nomeadamente argilas, siltes e areias, que se encontram misturados entre si em proporções variáveis (Torgal et al., 2009). Visto que o comportamento de um determinado solo é função desta distribuição granulométrica, bem como da quantidade de água (UNE 41410, 2008), torna-se fundamental conhecer as suas propriedades através de ensaios de caracterização que permitem verificar a adequabilidade para a construção em terra. Esses ensaios podem ser divididos em ensaios expeditos, a realizar no local da obra, e em ensaios laboratoriais, realizados de forma controlada e segundo procedimentos normalizados. No caso dos solos residuais graníticos do norte de Portugal, a sua adequabilidade para a construção em terra é muito reduzida, ou mesmo inexistente, dada a fraca contribuição e atividade da fração argilosa. Assim, é necessário efetuar a sua prévia estabilização através da utilização de uma das técnicas conhecidas, nomeadamente a estabilização química, onde é promovida a adição de produtos de cimentação que propiciam a aglutinação das partículas (Silva et al., 2013). Tradicionalmente, os produtos mais utilizados são o cimento e a cal. No entanto, nos últimos anos, e devido às crescentes preocupações ambientais e económicas, têm sido desenvolvidos novos ligantes, entre os quais se encontram aqueles baseados na ativação alcalina de cinzas volantes (Cristelo et al., 2012). Os estudos realizados por estes autores têm especial interesse também do ponto de vista ambiental, já que os materiais utilizados para promover a melhoria do solo, apresentam baixos valores de emissão de CO₂ (Cristelo et al., 2015), quer pela sua utilização, quer pelo seu processo de fabrico, apresentando ainda a vantagem da incorporação de um resíduo industrial com significativos volumes de produção em Portugal, i.e. as cinzas volantes.

As cinzas volantes, obtidas das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão queimado numa central termoelétrica, são constituídas por partículas esféricas de pequenas dimensões que variam entre 1 e 100µm, com valores de superfície específica compreendidos entre 250m²/kg e 600m²/kg. Apresentam propriedades pozolânicas importantes, sendo largamente utilizadas como aditivos em argamassas e betões, reduzindo os seus custos de fabrico e aumentando a sua resistência e durabilidade. São importantes para o processo de ativação alcalina, assumindo-se como uma fonte de silício e alumínio, por serem constituídas maioritariamente por dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃). As cinzas volantes da classe F apresentam baixos teores de cálcio e propriedades não aglomerantes, necessitando de um agente de cimentação como o cimento, a cal viva, a cal hidratada ou, em alternativa, um ativador químico, como o silicato de sódio, que poderá conduzir à formação de um geopolímero. Segundo Teixeira Pinto (2002) e Cristelo et al. (2012), a ativação alcalina apresenta-se como uma técnica inovadora com enormes potencialidades para a estabilização de solos. Permite incorporar todo o tipo de resíduos ricos em silício e alumínio na obtenção de bases ligantes, onde as matrizes cimentícias aumentam a capacidade de confinamento de resíduos tóxicos radioativos e metais pesados (Teixeira Pinto, 2006). De um ponto de vista químico, os materiais obtidos por ativação alcalina (MAA) apresentam a mesma constituição que os zeólitos, baseada em alumino-silicatos hidratados, muito embora a estrutura cristalina apresentada pelos zeólitos não esteja ainda totalmente desenvolvida nos MAA. A estrutura é pois constituída por uma malha tridimensional em que os átomos de silício alternam com os átomos de alumínio, em coordenação tetraédrica, compartilhando todos os oxigénios, tendo resultado de uma reação de hidratação dos alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalinoterrosas em forma de hidróxidos (ROH, R(OH)₂), sais silicatados (R₂(n)SiO₂), sais de ácidos fracos (R₂CO₃; R₂S; R₂F) ou sais de ácidos fortes (Na₂SO₄, CaSO₄.2H₂O), em que R é normalmente um ião do tipo Na⁺, K⁺ ou Ca²⁺ (Teixeira Pinto, 2002). Uma das principais vantagens dos geopolímeros está na sua inércia química face à maior parte das agressões ambientais, apresentando níveis muito baixos de lixiviação por águas correntes, bem como valores de permeabilidade baixos quando comparados com outros materiais correntes.

Após a definição da técnica construtiva e da técnica de melhoria de solo a utilizar, foi realizado um programa experimental que englobou ensaios de caracterização do material e das unidades de BTC, e de caracterização de algumas propriedades da própria alvenaria. Como tal, foram realizados ensaios de compressão em unidades de BTC, que é um método básico e universal para avaliação da resistência e qualidade de unidades de alvenaria, e ensaios de caracterização da alvenaria, nomeadamente: (i) compressão de prismas formados por 5 BTC; (ii) corte de prismas de 3 BTC, de modo a avaliar a interface entre as juntas de BTC; e (iii) compressão de paredes de BTC, representativas do sistema de alvenaria. A caracterização foi realizada sobre o sistema de alvenaria com junta seca e com junta argamassada.

2 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1 - Solo

Foi recolhido um solo residual granítico nas imediações de Guimarães (doravante designado por SRGP), o qual foi submetido a uma série de ensaios de caracterização geotécnica. A necessidade desta caracterização prende-se com a avaliação da adequabilidade para fabrico de BTC a serem utilizados no programa experimental. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados no Quadro 1, de forma resumida.

Quadro 1 - Resumo da caracterização do SRGP

Ensaio	Parâmetro em avaliação	Resultados
Análise Granulométrica (LNEC E196, 1966)	Seixo e areia (%) ($0.06\text{mm} < \Phi \leq 20\text{mm}$)	82
	Silte (%) ($0.002\text{mm} < \Phi \leq 0.06\text{mm}$)	14
	Argila (%) ($\Phi \leq 0.002\text{mm}$)	4
Limites de Consistência (NP 143, 1969)	Limite de liquidez (%)	28
	Limite de plasticidade (%)	---
Densidade das Partículas (NP 83, 1965)	Peso específico dos grãos (g/cm^3)	2,62
Ensaio de Proctor Leve (LNEC E197, 1966)	Teor em água ótimo (%)	12,1
	Baridade seca máxima (g/cm^3)	1,71

É possível observar, através do fuso proposto por Viana da Fonseca (1996) (Figura 1a), que se está na presença de um solo residual típico do Norte de Portugal. Segundo a norma australiana HB 195 (2009), a norma espanhola UNE 41410 (2008) (Figura 1b) e o fuso proposto por Houben e Guillaud (2008) (Figura 1c) relativo à adequabilidade para construção em terra, este solo apresenta uma percentagem de argila abaixo dos limites mínimos recomendados por estes, que variam entre de 5 e 10%.

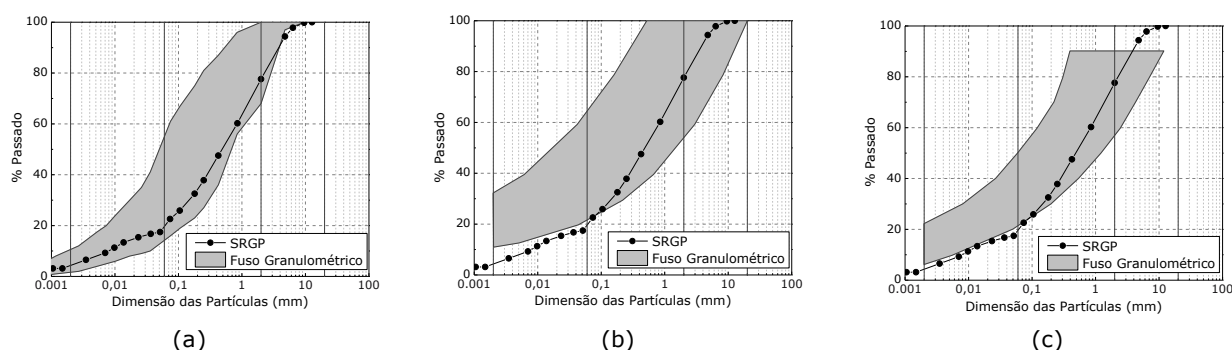


Figura 1 - Curva granulométrica do SRGP e comparação com fusos granulométricos propostos na literatura: (a) Viana da Fonseca (1996); (b) UNE 41410 (2008); (c) Houben e Guillaud (2008)

Barbosa et al. (2002) recomendam um valor mínimo menos restrito, já que sugere que o solo possua entre 50 a 70% de areia, 10 a 20% de silte e 1 a 20% de argila. É conhecido que o baixo teor de argila pode ter implicações nos BTC, quer a nível de produção (dada a dificuldade em manter a coesão em níveis minimamente adequados ao seu manuseamento), quer mesmo ao nível da resistência, igualmente devido à reduzida coesão do material. Assim, a adequabilidade deste solo para produzir BTC é muito reduzida, sendo por isso necessário aumentar artificialmente o seu nível de cimentação.

2.2 - Cinzas volantes

As cinzas volantes utilizadas neste trabalho (Figura 2) são da classe F e foram recolhidas na central termoelétrica do Pego. A caracterização química, realizada com recurso a Espectroscopia de Energia Dispersa (EDS), permitiu concluir que a percentagem, em termos de massa atómica, de silício, alumínio e cálcio é de aproximadamente 75% (Quadro 2).

Quadro 2 - Composição química das cinzas volantes obtida por EDS

Elemento	Si	Al	Na	Ca	Fe	Outros
Percentagem	48,81	21,77	1,31	3,85	14,74	9,52

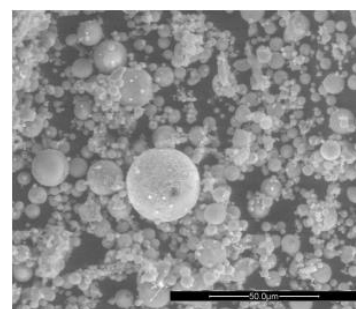


Figura 2 - Imagem da microestrutura das cinzas volantes (ampliação de 1600x)

Foram realizadas medições com o intuito de determinar a dimensão das partículas que constituem as cinzas volantes. É importante referir que estas medições permitem apenas identificar a média das dimensões das esferas maiores, pois são aquelas que se encontram mais suscetíveis de serem medidas (Quadro 3).

Quadro 3 - Dimensão das partículas que compõem as cinzas volantes

N.º de medições (N)	Dimensão mínima (µm)	Dimensão máxima (µm)	Dimensão média (µm)	Desvio padrão
126	3,72	44,51	11,64	8,05

2.3 - Ativador alcalino

O ativador, obtido através da mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₂), desempenha duas funções principais. A primeira é de conferir trabalhabilidade à mistura, e a segunda de reagir com o silício e o alumínio presentes na matéria-prima potenciando as suas capacidades na formação do produto final.

Para o desenvolvimento do trabalho descrito ao longo deste texto foi utilizado hidróxido de sódio, adquirido no estado sólido e posteriormente transformado em solução, com uma pureza de 98%. O silicato de sódio utilizado no processo de ativação foi adquirido na forma de solução. Este é constituído por Na₂O (óxido de sódio) e SiO₂ (dióxido de silício) numa proporção aproximada, em massa, de 1:2.

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 - Produção de BTC

A geometria adotada para os BTC utilizados neste estudo consiste num tipo de bloco com aligeiramentos verticais e sistema de encaixe (Figura 3). O sistema de aligeiramento adotado permite reduzir o peso do bloco, o reforço estrutural e a passagem de instalações hidráulicas e elétricas. O aparelho da alvenaria consiste num sistema de encaixe mecânico, conseguido sem o uso de argamassa, que permite a construção de paredes de pano simples e duplo, promovendo assim uma construção mais simples, rápida e económica.

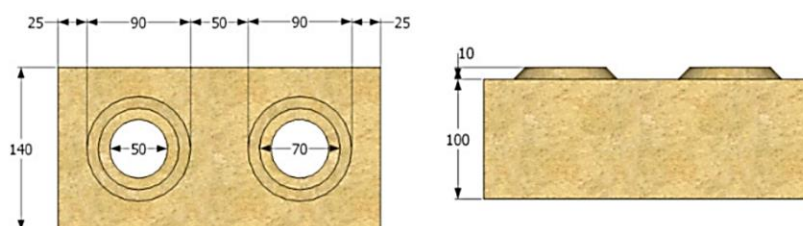


Figura 3 - Geometria e sistema de encaixe dos BTC (Sturm et al., 2013)

Silva et al. (2014) estudaram diferentes misturas de materiais com SRGP, em que foram utilizados processos de melhoria do solo com diferentes materiais, para aplicação na produção de BTC, inclusive com recurso à ativação alcalina de cinzas volantes. Nesta estabilização a mistura que apresentou resultados mais promissores foi aquela que continha na sua composição uma percentagem de cinzas volantes de 15%, sendo a escolhida para o fabrico dos BTC objeto de estudo (Quadro 4).

Quadro 4 - Composição da mistura para fabrico dos BTC

Fase Sólida (%)		Fase Líquida (%)		Fase Sólida/ Fase Líquida (%)	Concentração NaOH ₂ (molal)
Cinzas	Solo	NaOH ₂	Na ₂ SiO ₂		
15	85	66,7	33,3	13,7	12,5

Após a secagem e destorroamento do SRGP procedeu-se à preparação do ativador e à pesagem de cada um dos constituintes da mistura de forma a produzir 10 BTC. Após pesagem, foi utilizada uma misturadora de eixo vertical de pás giratórias, onde foi efetuada a homogeneização da mistura (Figura 4a), por adição progressiva do ativador. O aspeto final da mistura pode ser observado na Figura 4b. Após a preparação da mistura, foi utilizada uma prensa manual Terstaram® para se proceder à moldagem dos BTC (Figura 4c). Esta prensa permite a aplicação de cerca de 2-4MPa de pressão, tendo sido controlado o peso de mistura a utilizar para produzir cada um dos blocos. Após a moldagem, os BTC foram deixados em cura à temperatura ambiente do laboratório (Figura 4d), que apresentou ao longo deste processo uma temperatura média de 18°C e uma humidade relativa média de 62%. Estes valores vão de encontro aos indicados na norma NP EN 772-1 (2002).

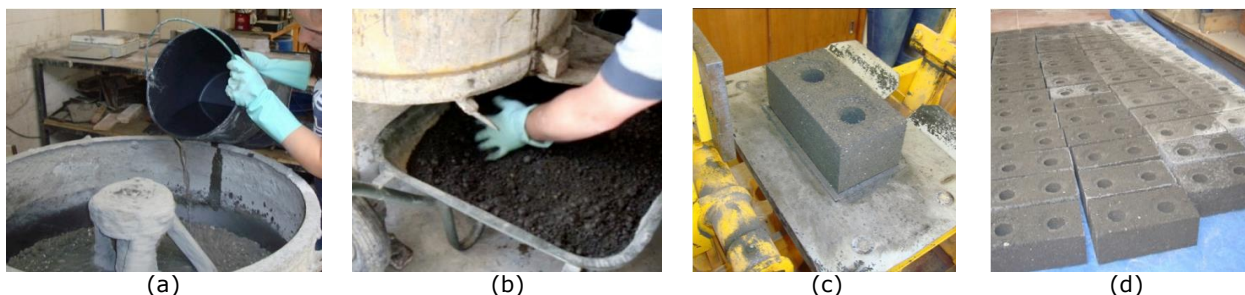


Figura 4 - Fabrico de BTC: (a) preparação da mistura; (b) aspeto final da mistura; (c) moldagem; (d) cura

3.2 - Argamassa à base de cinzas ativadas

A argamassa de assentamento geralmente utilizada em alvenarias de BTC é constituída pelo mesmo solo e pelo mesmo estabilizante utilizado na produção dos blocos. Nos trabalhos desenvolvidos por Silva et al. (2015), foram efetuados ensaios de compressão em prismas de 5 BTC com junta seca, tendo sido verificado que a inexistência de argamassa conduz à concentração de tensões, reduzindo a resistência dos prismas face às unidades em cerca de 50%. Como intuito de mitigar este problema foi desenvolvida uma argamassa de cinzas ativadas (ACA), à base de solo, para utilizar nas juntas de assentamento da alvenaria. Pretendia-se uma argamassa de baixa resistência e elevada deformabilidade, que fosse capaz de distribuir de forma mais uniforme as tensões aplicadas à alvenaria. A utilização desta argamassa permitirá retirar conclusões sobre a sua influência no comportamento global da alvenaria.

O solo utilizado na produção dos provetes foi seco, destorroado e peneirado de forma a que a composição granulométrica não apresentasse partículas de dimensão superior a 2mm. Após o fabrico da ACA foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento com base no disposto na norma EN 1015-3 (CEN 1999b), o qual permite avaliar as propriedades das argamassas no estado fresco, estando este diretamente relacionado com a trabalhabilidade e facilidade de aplicação. Segundo Gomes et al. (2012), as argamassas de terra que apresentem valores de espalhamento compreendidos entre 160mm e 175mm podem ser classificadas como argamassas com trabalhabilidade excelente. Contudo, a ACA desenvolvida neste trabalho apresenta um valor de espalhamento de 180mm. No entanto, verificou-se durante o processo de construção das paredes que a trabalhabilidade apresentada era, ainda assim, bastante satisfatória.

Após avaliar a trabalhabilidade da argamassa no estado fresco foram realizados ensaios para determinar o seu comportamento mecânico no estado endurecido, ao longo do tempo. Nesse sentido, foram fabricados provetes para determinação da resistência à tração (por flexão), da resistência à compressão em prismas de $40 \times 40 \times 160$ (mm³) e da resistência à compressão em cilindros com diâmetro de 50mm e altura de 100mm. Os ensaios foram realizados segundo a norma EN 1015-11 (CEN 1999d). Os provetes, ensaiados com 30, 60 e 90 dias de idade, foram curados em ambiente similar ao descrito na secção anterior.

Os resultados obtidos, que podem ser observados na Figura 5, indicam que a resistência, em termos médios, se mantém quase constante entre os 30 e os 60 dias de cura, com valores muito próximos de 1MPa. A partir desta idade verificam-se dois comportamentos distintos. No que diz respeito à resistência à compressão, observa-se um aumento para valores próximos de 1,5MPa aos 90 dias de cura, enquanto que a resistência à tração por flexão diminuiu para valores na ordem 0,6 MPa, para o mesmo tempo de cura.

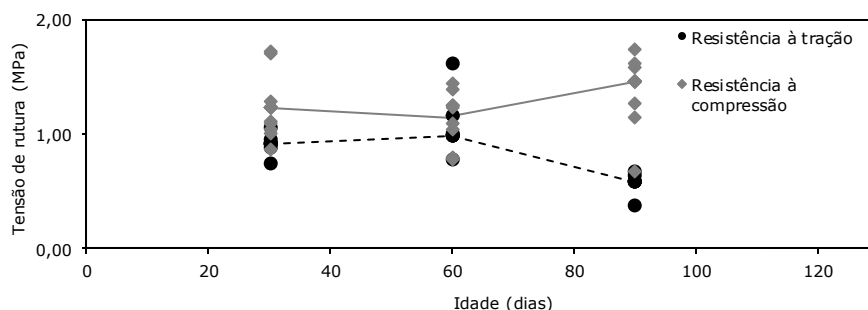


Figura 5 - Resistência à tração por flexão e resistência à compressão de prismas de ACA

Os resultados da resistência à compressão realizados nas metades resultantes do ensaio à flexão são influenciados pelo confinamento. Assim, optou-se por complementar o estudo com a realização de ensaios à compressão em provetes cilíndricos. Os provetes utilizados, com um rácio de altura/diâmetro muito próximo de 2, permitem alcançar uma resistência muito próxima da não confinada, bem como a leitura das deformações axiais durante o ensaio. O ensaio de resistência à compressão de cilindros foi efetuado tendo por base as recomendações presentes na norma NBR 8522 (2003). O ensaio de compressão foi realizado

em controlo de deslocamentos, com uma velocidade de $20\mu\text{m/s}$, segundo o esquema de ensaio representado na Figura 6.

Como é possível verificar no Quadro 5, a resistência à compressão (f_c) dos provetes cilíndricos de ACA mantém-se praticamente constante com a evolução temporal da idade de cura. Aos 30 dias de idade apresenta uma resistência à compressão de 1,8MPa, valor que sobe para os 2,1MPa aos 60 dias, mantendo-se constante para os 90 dias de idade.

Quadro 5 - Resultados para a resistência à compressão (coeficiente de variação entre parênteses)

	Idade de cura (dias)		
	30	60	90
f_c (MPa)	1,8 (13%)	2,1 (19%)	2,1 (20%)



Figura 6 – Ensaio em cilindros de ACA

3.3 - Desempenho mecânico de unidades de BTC

Foram realizados ensaios de compressão uniaxial no sentido de se caracterizar o desempenho mecânico das unidades de BTC que apresentavam diferentes idades de cura. Este tipo de ensaios é um método básico e universal de caracterização das unidades de alvenaria. Têm como principal objetivo compreender a evolução temporal da resistência, permitindo dessa forma conhecer qual a idade em que os BTC apresentam resistência suficiente para a construção e quando esta atinge o seu máximo.

Antes da realização do ensaio foi verificado se existiam irregularidades ou ranhuras em cada um dos provetes, seguindo-se a pesagem e a determinação da sua área de contacto e do seu volume. Os ensaios, realizados em diferentes idades de cura (7, 14, 21, 28, 42, 56, 70, 90, 120, 150 e 180 dias), foram executados de acordo com a norma NP EN 772-1 (2002), diferindo desta no número de provetes por amostra, tendo sido utilizados 3 em cada ensaio, e na velocidade de ensaio, sendo realizado em controlo de deslocamento, com uma velocidade de $4\mu\text{m/s}$. A aplicação da carga com controlo de deslocamento permite observar o comportamento do bloco no pós-tensão de rutura de uma forma mais evidente.

Na Figura 7 é possível observar a evolução temporal da tensão de rutura das unidades de BTC e a sua densidade média em cada idade de ensaio. Conclui-se que, de uma forma geral, a tensão de rutura das unidades aumenta com a evolução da idade de cura. Contudo, é possível observar um ponto de inflexão aos 28 dias, facto que foi comprovado pela realização de outros ensaios e que parece ser característico na utilização deste tipo de ligantes. Não obstante, nota-se a existência de duas inclinações distintas na curva apresentada, uma que se verifica até aos 21 dias de cura e outra após essa idade. Estes ensaios permitem indicar que a tensão máxima de rutura tende para valores próximos de 7MPa.

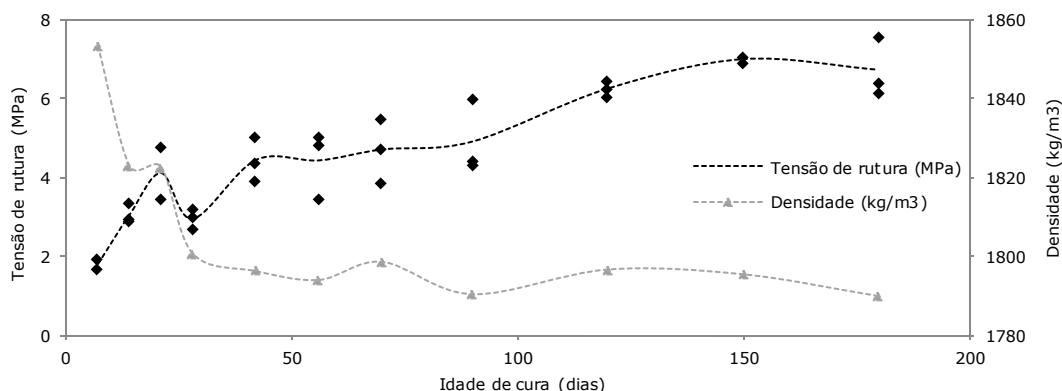


Figura 7 - Evolução temporal da tensão de rutura e densidade das unidades de BTC

Observando o comportamento dos BTC durante o carregamento e a pós-rutura através das curvas de tensão-extensão para as idades de cura de 28, 90 e 180 dias (Figura 8a), é possível verificar o respetivo aumento da tensão de rutura e a respetiva diminuição da extensão com o aumento da idade de cura. No entanto, parece existir uma redução da ductilidade com o aumento da idade de cura, o que conduz a um aumento da fragilidade da rutura. Verifica-se de uma forma geral que o modo dessa rutura é caracterizado pela formação de um tronco de pirâmide junto aos pratos e uma linha de rutura a ligar os dois troncos, explicado pelo confinamento introduzido pelas placas de carregamento (Figura 8b).

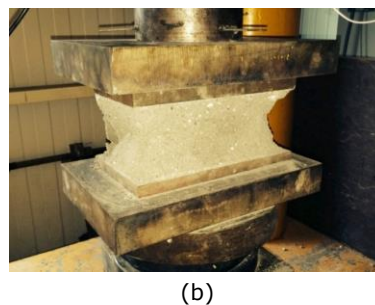
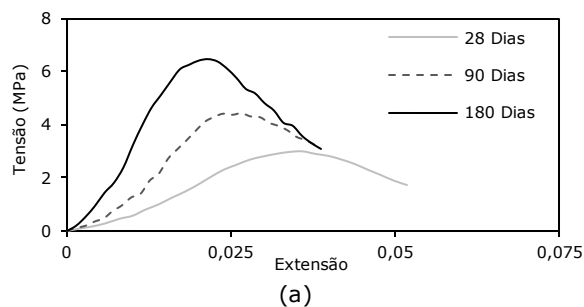


Figura 8 - Ruptura das unidades de BTC: (a) gráfico tensão-extensão de compressão uniaxial; (b) modo de ruptura típico das unidades de BTC

Pela análise do exposto nas normas australiana (HB 195, 2009), neozelandesa (NZS 4298, 1998) e espanhola (UNE 41410, 2008), verifica-se que o valor mínimo exigido para a resistência à compressão é 1MPa, 1,52MPa e 1,3MPa, respetivamente, indicando que os BTC em estudo cumprem estas regulamentações logo a partir dos 7 dias de cura. Ainda no referente à UNE 41410 (2008), esta classifica a resistência à compressão das unidades de BTC em 3 classes, permitindo que os BTC objeto de estudo possam ser classificados como classe 5 (classe máxima) após quatro meses de cura.

3.4 - Desempenho mecânico da alvenaria de BTC

Com o intuito de caracterizar o desempenho mecânico da alvenaria de BTC e aferir sobre a influência da introdução de uma argamassa de junta, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em prismas de 5 BTC, ensaios de corte duplo em prismas de 3 BTC e ensaios de compressão axial em paredes de pequena escala.

3.4.1 - Ensaios de compressão uniaxial

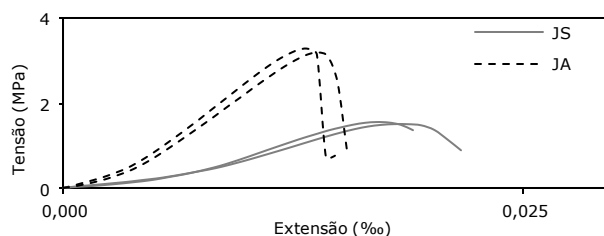
Foram construídos provetes prismáticos com 5 BTC, com e sem argamassa de junta, designados por JA e JS, respetivamente. Quando os blocos apresentavam 110 dias de cura procedeu-se ao ensaio dos prismas segundo a norma ASTM C1314-03b (2003). Os provetes apresentam um rácio entre a altura e a espessura de aproximadamente 3,6, respeitando o constante na norma. O ensaio foi realizado com controlo de deslocamentos à velocidade de 4µm/s. É possível observar na tabela da Figura 9a os resultados obtidos para os ensaios realizados aos prismas com os dois sistemas.

Verifica-se que os prismas com junta seca apresentam uma resistência à compressão ($f_{c,p}$) que é cerca de 27,5% da resistência obtida para as unidades de BTC com a mesma idade de cura. Este elevado decréscimo de resistência está associado à existência de pontos de concentração de tensões entre os BTC, uma vez que não existe argamassa de junta capaz de dissipar esse efeito. No caso dos prismas construídos com argamassa de junta observa-se que a sua resistência é 62,5% da observada para o caso das unidades. É possível observar que a introdução de argamassa representou um aumento da tensão de ruptura superior a duas vezes a que foi observada no sistema sem argamassa.

Na Figura 9b são apresentados os gráficos de tensão-extensão obtidos através deste ensaio. Estes permitem observar o comportamento dos prismas de BTC durante o ensaio, bem como determinar o módulo de elasticidade ($E_{30-60,p}$) associado a cada sistema construtivo. Por observação direta da figura é possível indicar a existência de uma zona inicial de ajuste presente nos dois sistemas e induzido pelo esquema de ensaio.

	JS	JA
$f_{c,p}$ (MPa)	1,54 (3%)	3,49 (8%)
$E_{30-60,p}$ (MPa)	133,8 (13%)	364,1 (4%)

(a)



(b)

Figura 9 - Ensaios de compressão uniaxial em prismas: (a) resultados de tensão de ruptura e módulo de elasticidade (coeficiente de variação entre parênteses); (b) gráfico tensão-deformação dos dois sistemas construtivos em estudo

Enquanto o sistema JS apresenta um comportamento pós-pico com degradação gradual das cargas, confirmando o comportamento dúctil, o sistema JA exibe uma degradação da carga mais acelerada, refletindo o seu comportamento frágil. Outra diferença de especial importância é o declive das curvas na

fase pré-pico, em que o sistema JA apresenta um declive mais acentuado do que o sistema JS. Para quantificar a rigidez dos respetivos sistemas, e visto que a forma da parte inicial da curva tensão-deformação foi condicionada pelo ajuste do sistema de ensaio, foram adotados os valores no intervalo de 30% a 60% da tensão de rotura, fase em que as curvas se encontram em ramo linear.

É possível assim verificar que o módulo de elasticidade do sistema JA foi cerca de 2,7 vezes superior ao do sistema JS. Este facto deve-se essencialmente à deformação das juntas, que diminuiu cerca de 35% com a utilização da argamassa.

3.4.2 - Ensaio de corte duplo

Os ensaios de corte duplo permitem determinar o comportamento ao corte das juntas da alvenaria, bem como retirar conclusões acerca do comportamento dos diferentes tipos de junta. Os ensaios foram realizados segundo a norma EN 1052-3 (CEN 1999b), a qual exige três níveis de confinamento diferentes, de aplicação perpendicular às juntas. Os três níveis de tensão de confinamento utilizados foram 0,1, 0,3 e 0,5MPa, que correspondem a forças aplicadas de aproximadamente 3,5, 10,5 e 17,5kN, respetivamente. Foi adotado o controlo do ensaio em deslocamento com uma velocidade de 10µm/s. Os provetes foram ensaiados quando os BTC apresentavam uma idade de 110 dias. O esquema utilizado pressupõe a aplicação de uma força vertical constante durante todo o ensaio, que confere a tensão de confinamento desejada, e a aplicação de uma força no bloco central, paralela às juntas, até ser atingida a resistência ao corte das juntas inferior e superior (Figura 12a). Estes ensaios permitem obter o coeficiente de atrito, a resistência ao corte inicial e a dilatação nas interfaces. Tal como pode ser observado na Figura 10, e como seria expectável, com o aumento da tensão de confinamento existe um aumento da resistência ao corte nos dois sistemas estudados. No que diz respeito à tensão de corte inicial obteve-se um valor de 0,13MPa e de 0,29MPa para os sistemas JA e JS, respetivamente.

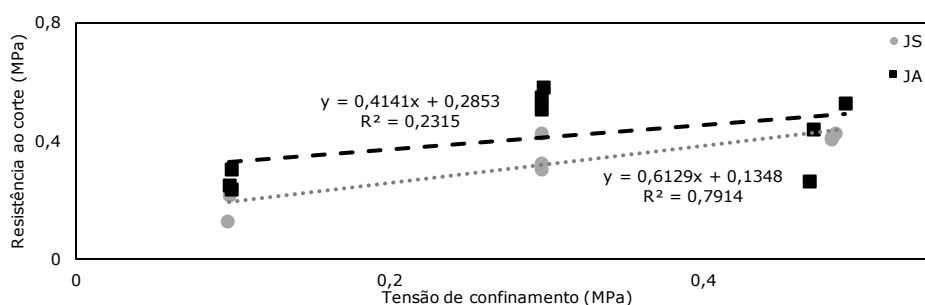


Figura 10 - Relação entre a resistência ao corte e o nível de tensão de confinamento

Relativamente ao coeficiente de atrito, no caso do sistema JS este assume valores de 0,61 ($\Phi=31^\circ$) enquanto no sistema JA se verifica uma não linearidade na envolvente de rutura. Contudo, é possível ainda assim notar que o valor mínimo do coeficiente de atrito sugerido pela referida norma é cumprido, apresentando um valor de 0,41 ($\Phi=22^\circ$).

A dilatação foi calculada para cada ensaio através da relação entre o deslocamento axial e o deslocamento de corte para a máxima tensão de corte. O gráfico exposto na Figura 11 apresenta os valores da dilatação em função do nível de tensão de confinamento.

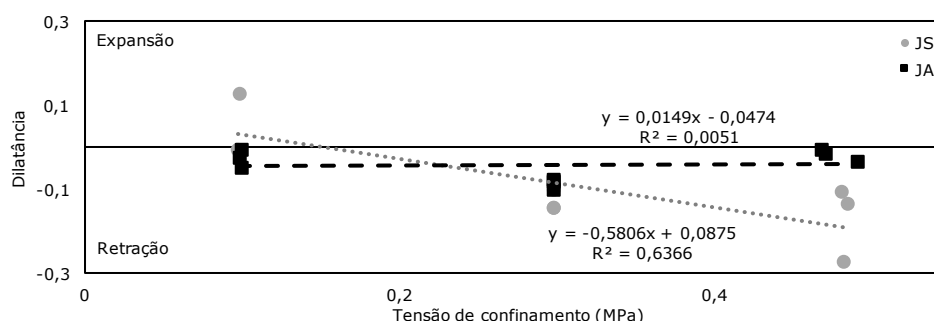


Figura 11 - Relação entre a dilatação e a tensão de confinamento para os sistemas construtivos estudados

No caso do sistema JS é possível observar que para o nível de tensão de confinamento inferior (0,1MPa) a dilatação assume valores positivos, tendendo para valores negativos com o aumento dessa tensão. O valor de dilatação positivo na sua relação com o nível de confinamento indica que o efeito de rampa dos encaixes é capaz de vencer o nível de compressão imposto, enquanto que o valor de dilatação negativa significa que o efeito de rampa é vencido e a junta é desgastada. No sistema JA é possível verificar que a dilatação assume valores negativos em todos os níveis de tensão de confinamento utilizados, observando-se a

predominância do desgaste das juntas quando é aplicado o deslocamento de corte. Tal facto sugere que a introdução da argamassa de junta conduz à eliminação do efeito de rampa nos encaixes.

Com a realização dos ensaios foi possível verificar que o modo de rutura dos prismas para o sistema JS no nível de confinamento de 0,1MPa se dá por corte, observando-se o deslizamento do bloco central em relação aos outros adjacentes por desgaste e rotura dos encaixes, comprovando a contribuição destes para a resistência ao corte. No nível de confinamento de 0,3MPa verifica-se que o prisma rompeu por corte e por esmagamento, numa situação de rotura mista, rompendo o BTC central ao longo de todo o seu comprimento. Já no caso do nível de confinamento mais elevado, atesta-se também a existência de um modo de rutura misto, ocorrendo um deslizamento mais notório do bloco central, mas onde os danos por esmagamento parecem ser menores, tal como está patente na Figura 12b. Para os prismas do sistema JA foi possível verificar que o modo de rutura é muito semelhante para os três níveis de confinamento utilizados (Figura 12c). Em todos eles, o bloco central deslizou em relação aos outros dois, não sendo visível nenhum sinal de esmagamento à exceção de algum desgaste nos seus cantos. Neste caso, a resistência ao corte foi conferida pela alteração das propriedades das interfaces por introdução da argamassa de assentamento.

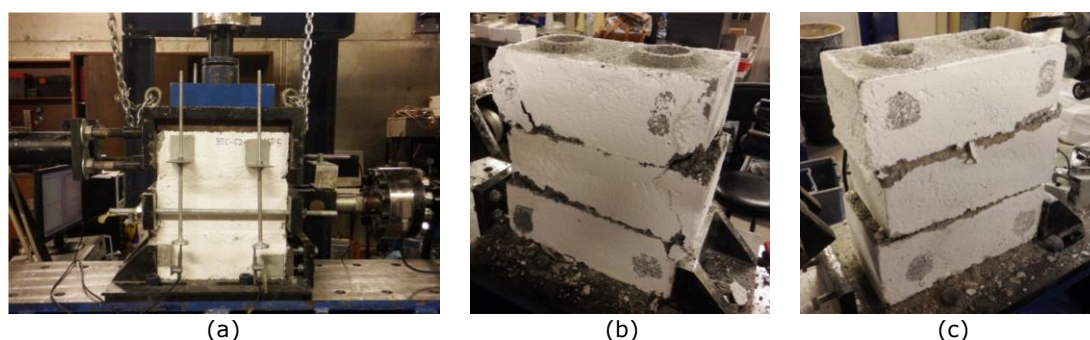


Figura 12 – Ensaio de corte duplo: (a) esquema de ensaio; (b) exemplo de rutura do sistema JS; (c) exemplo de rutura do sistema JA

3.4.3 - Ensaio de compressão uniaxial em paredes de alvenaria

De forma a validar o comportamento estrutural de ambos os sistemas foram realizados ensaios de compressão em pequenas paredes de alvenaria. Foram realizados ensaios de compressão uniaxial em paredes de acordo com o disposto na norma EN 1052-1 (CEN 1999b). Para tal foram construídas 3 paredes para cada um dos sistemas construtivos com um rácio entre a altura e a largura de 1,05. Para além da colocação de transdutores de deslocamento (LVDT) verticais referida na norma, foram colocados também transdutores horizontais (Figura 14a). Os ensaios foram realizados em BTC com aproximadamente 110 dias de cura. Nesta idade é esperado, pelos resultados obtidos no ensaio das unidades de BTC, que estes apresentem uma resistência à compressão que ronde os 5 a 6MPa, e que este valor seja de aproximadamente 2MPa para a argamassa.

Optou-se por efetuar o controlo do ensaio em deslocamento, adotando uma velocidade de 13 $\mu\text{m/s}$, com o propósito de obter resultados expressivos para a análise do comportamento pós-pico. Este ensaio possibilita obter resultados para caracterização da resistência à compressão da alvenaria ($f_{c,w}$) e do seu módulo de elasticidade ($E_{30-60,wi}$), conforme se pode observar no Quadro 6.

Quadro 6 - Tensão de rutura e módulo de elasticidade de paredes (coeficiente de variação entre parênteses)

	JS	JA
$f_{c,w}$ (MPa)	0,93 (6%)	2,91 (5%)
$E_{30-60,wi}^{(1)}$ (MPa)	97,8 (16%)	909,7 (3%)

⁽¹⁾ Módulo de elasticidade determinado com recurso às medições efetuadas pelos LVDT.

Seguindo a tendência já evidenciada nos ensaios de compressão de prismas, também aqui se observa que a tensão de rutura é mais baixa no caso do sistema JS. A introdução da argamassa de junta melhora o comportamento da alvenaria de BTC no que diz respeito à sua resistência à compressão, sendo possível verificar um aumento da sua tensão de rutura em mais de 3 vezes. O valor obtido para a resistência à compressão do sistema JS representa cerca de 60% da resistência atingida no caso dos prismas e aproximadamente 17% no caso das unidades. No que diz respeito ao sistema JA estes valores são mais elevados, situando-se em 85% no caso da resistência atingida pelos prismas e cerca de 50% da resistência atingida no ensaio de compressão das unidades.

A Figura 13 ilustra a deformação ocorrida durante o ensaio através da relação entre a tensão e a extensão, registada pelos LVDT colocados nas faces principais das paredes. No caso do sistema JA as deformações axiais durante o ensaio são muito reduzidas, contrastando com o que acontece no caso do sistema JS, onde

o ajuste devido ao sistema construtivo é bastante notório. De igual forma, estes fenómenos também são observados no caso da extensão transversal, sendo significativa apenas para valores muito próximos da rutura, resultando da abertura de fendas maioritariamente axiais (i.e. verticais).

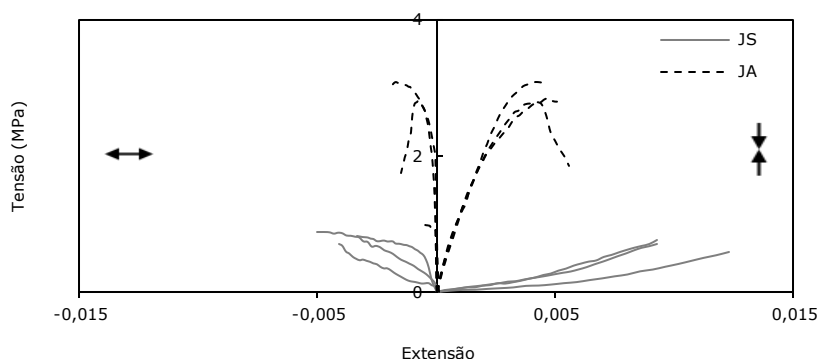


Figura 13 - Gráficos tensão-extensão das paredes

No que diz respeito à extensão vertical interna, é possível observar que no caso do sistema JA as deformações durante o ensaio são muito reduzidas, contrastando com o que acontece no caso do sistema JS, onde o ajuste devido ao sistema construtivo é bastante notório. De igual forma, estes fenómenos também são observados no caso da extensão horizontal, sendo significativa apenas para valores muito próximos da rutura, resultando da abertura de fendas maioritariamente verticais.

O módulo de elasticidade foi calculado no intervalo entre 30% e 60% da tensão de rutura e através de uma regressão linear, com o auxílio do gráfico da figura anterior. É possível concluir que se dá o aumento do módulo quando se compara os valores obtidos para o sistema JA com os obtidos para o sistema JS, traduzindo-se a introdução da argamassa de junta num crescimento do módulo em cerca de 9 vezes face ao obtido para a alvenaria de junta seca.

No que diz respeito aos modos de rutura, é possível verificar que os dois sistemas apresentam modos distintos. Tal como é possível observar na Figura 14b, as paredes do sistema JS apresentaram o aparecimento de fissuras maioritariamente verticais, que se propagaram lentamente ao longo do ensaio refletindo o comportamento dúctil do sistema. No caso das paredes do sistema JA (Figura 14c), verificou-se a tendência para o aparecimento das fissuras ao nível das juntas verticais e das juntas horizontais, bem como na zona dos aligeiramentos dos BTC. As fissuras tendem a formar-se nos cantos da parede, desenvolvendo-se de forma vertical e com maior expressão na zona central da alvenaria. A rutura apresenta-se como sendo mais frágil que a rutura do sistema construtivo de junta seca.

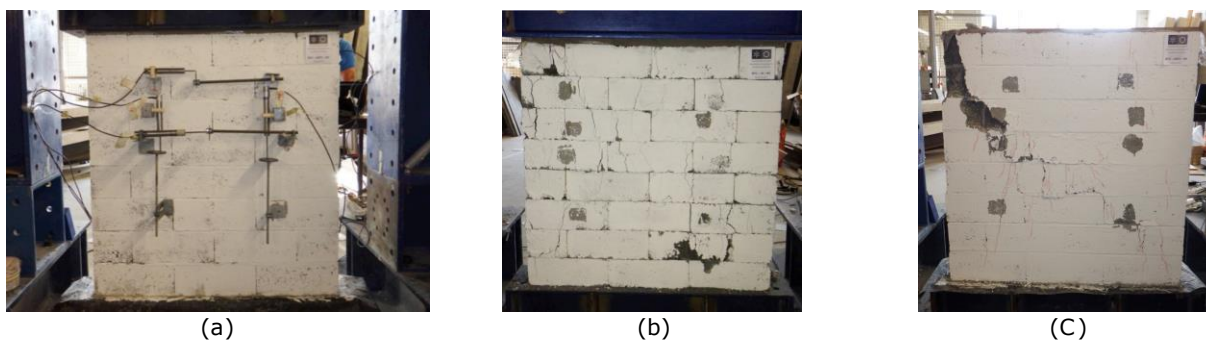


Figura 14 – Ensaio em panos de parede: (a) esquema de ensaio; (b) rutura típica do sistema JS; (c) rutura típica do sistema JA

4 - CONCLUSÕES

A evolução temporal da resistência dos BTC estabilizados com cinzas volantes alcali-ativadas é mais irregular que a observada com o uso de cimento, onde praticamente toda a resistência é conseguida ao fim de 28 dias, verificando-se uma certa instabilidade na evolução da tensão resistente para idades mais jovens, sendo que aos 28 dias apenas é atingida cerca de 40% da tensão resistente observada aos 180 dias. Contudo, nota-se que a formulação dos BTC respeita as exigências mínimas de resistência expressas nas normas internacionais logo a partir dos 7 dias de idade.

Nos ensaios efetuados para caracterizar a alvenaria com sistema JS verifica-se um decréscimo de resistência em relação às unidades de alvenaria bastante acentuado, apresentando uma redução para cerca de 27,5% no caso dos prismas de 5 BTC e para cerca de 17% no caso das paredes. Comparativamente aos

prismas, a tensão de rutura das paredes atinge cerca de 60% da tensão de rutura dos prismas de 5 BTC, estando relacionado com a elevada rigidez dos blocos e com a sua incapacidade para acomodar deformações localizadas, conduzindo à concentração de tensões e à posterior rutura precoce do sistema. O aparecimento de fissuras para valores de tensão baixos e a sua propagação gradual ao longo do ensaio permite concluir que este sistema apresenta uma rutura dúctil.

No caso do sistema JA verifica-se uma redução da resistência em relação às unidades para cerca de 62,5% no caso dos prismas de 5 BTC e para cerca de 50% no caso das paredes de alvenaria. Já comparativamente aos prismas, a tensão resistente das paredes atinge aproximadamente 85% da sua tensão de rutura. Comparando os resultados obtidos para este sistema construtivo com os obtidos para os elementos de junta seca, é possível observar que a introdução da argamassa de junta proporciona um aumento da resistência de cerca de duas vezes nos prismas de 5 BTC e aproximadamente 3 vezes no caso das paredes. Este aumento demonstra a capacidade que a argamassa utilizada tem em absorver as tensões geradas entre os blocos, permitindo o aproveitamento mecânico mais eficaz dos mesmos na sua contribuição para a alvenaria. No entanto, este sistema exibe menor deformabilidade, ocorrendo a abertura das primeiras fissuras para valores de tensão muito próximos da rutura, apresentando uma rutura mais frágil, evidenciado pela rápida propagação das fissuras durante o ensaio.

Nos ensaios de corte efetuados em prismas de 3 BTC verifica-se que a introdução da argamassa de junta se traduz num aumento da resistência ao corte inicial em cerca de duas vezes. Também no caso do coeficiente de atrito existe uma redução com a introdução da argamassa, verificando-se o decréscimo do mesmo de 0,61 ($\Phi=31^\circ$) para 0,41 ($\Phi=22^\circ$). Estes valores estão de acordo com o valor mínimo de 0,4 exigido pelo Eurocódigo 6 (CEN 1999). É ainda possível afirmar que no caso dos resultados obtidos para a dilatação estes apresentam uma tendência para valores negativos, o que significa que as tensões de confinamento selecionadas conduzem ao esmagamento e degradação na interface entre os blocos.

Os resultados obtidos confirmam a potencialidade da técnica de ativação alcalina no que diz respeito ao melhoramento de solos, não estando esta necessariamente limitada a uma aplicação pré-definida.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia), através do ISISE, com o projeto IUD/ECI/04029/2013. Os autores querem expressar o seu agradecimento à PEGOP – Energia Elétrica SA, pelo fornecimento das cinzas volantes, e ao Grupo CJR, pelo fornecimento do solo, utilizados neste estudo.

BIBLIOGRAFIA

- Adam, E. e Agib, A. (2001). Compressed Stabilised Earth Block Manufacture in Sudan. Printed by Graphoprint for the United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. Paris, France. Graphoprint.
- ASTM C 1314 - 03b (2003). Standard test method for compressive strength of masonry prisms. ASTM Committee on Standards. ASTM International. United States.
- Barbosa, N., Mattone, R., e Mesbah, A. (2002). Blocos de Concreto de Terra : Uma Opção Interessante Para a Sustentabilidade da Construção Resumo. Sebrae - Biblioteca On Line. (in Portuguese)
- CEN (1999). EN 1052-1. Methods of test for masonry. Part 1: Determination of compressive strength. European Committee for Standardization. Brussels.
- CEN (1999d). EN 1015-11. Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for standardization. Brussels.
- CEN (1999b). EN 1015-3. Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). European Committee for standardization. Brussels.
- CEN (1999). EN 1052-3: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength. European Committee for standardization. Brussels.
- CEN (1999). Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. European Committee for standardization. Brussels.
- Cristelo, N., Miranda, T., Oliveira, D., Rosa, I., Soares, E., Coelho, P. e Fernandes, L. (2015). Assessing the Production of Jet Mix Columns using Alkali Activated Waste based on Mechanical and Financial Performance and CO₂ (eq) Emissions. Journal of Cleaner Production, 102, 447–460.

- Cristelo, N., Roma, R., Fernandes, L., Miranda, T., Oliveira, D. e Silva, R. (2012). Residual Granitic Soil Improvement for Rammed Earth Construction. In Sociedade Portuguesa de Geotecnia (Ed.), 13º Congresso Nacional de Geotecnia.
- Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. e Vitoux, F. (1996). Construire en Terre. (CRATERRE, Ed.) (3è édition). Paris, France. Editions l'Harmattan.
- Gomes, M., Gonçalves, T. e Faria, P. (2012). Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra. Apuntes. Vol. 25. Bogotá, Colombia.
- HB 195 (2009). The Australian earth building handbook. Dr Peter Walker e Standards Australia. Sydney, NSW 2001, Australia: Standards Australia International Ltd.
- Houben, H. e Guillaud, H. (2008). Earth Construction: A comprehensive guide. (Edition Pa). Marseille, France: Intermediate Technology Publications Ltd.
- Jaquin, P. e Augarde, C. (2012). Earth Building. History, science and conservation. IHS BRE Press.
- LNEC E197 (1966). Soils: Proctor compaction test. Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal. (in Portuguese)
- LNEC E196 (1966). Soils: particle size distribution analysis. Especificação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal. (in Portuguese)
- NBR 8522 (2003). Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.
- NP 83 (1965). Soils: particle density test. Portuguese Standard: Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal. (in Portuguese).
- NP 143 (1969). Soils: determination of consistency limits. Portuguese Standard: Instituto Português da Qualidade. Caparica, Portugal. (in Portuguese).
- NP EN 772-1 (2002). Determinação da resistência à compressão de blocos para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão. (in Portuguese)
- NZS 4298 (1998). Materials and workmanship for earth buildings. New Zealand Technical Committee. Wellington.
- Silva, R., Oliveira, D., Miranda, T., Cristelo, N., Escobar, M. e Soares, E. (2013). Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. Construction and Building Materials, 47, 181–191.
- Silva, R., Oliveira, D., Miranda, T., Esteves, P., Soares, E. e Cristelo, N. (2014). Mechanical Behavior of Compressed Earth Blocks Stabilized with Industrial Wastes. In Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Ed.), 14 Congresso Nacional de Geotecnia (p. 16). Covilhã.
- Silva, R., Soares, E., Oliveira, D., Miranda, T., Cristelo, N. e Leitão, D. (2015). Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. Construction and Building Materials, 75, 349–358.
- Sturm, T., Ramos, J., e Lourenço, P. (2013). Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks. Materials and Structures, 3059–3074.
- Teixeira Pinto, A. (2002). Novos sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina (geopolimerização). Construção Magazine. (in Portuguese)
- Teixeira Pinto, A. (2006). Introdução ao Estudo dos Geopolímeros. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. (in Portuguese)
- Torgal, F., Eires, R. e Jalali, S. (2009). Construção em Terra (TecMinho). Guimarães, Portugal: Publidisa. (in Portuguese)
- Torgal, F. P. e Jalali, S. (2011). O renascimento da construção com alvenaria de terra. Revista Maquinaria. Angola. (in Portuguese)
- UNE 41410 (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. AENOR. Madrid, Espanha.
- Viana da Fonseca, A. (1996). Geomechanics of the granitic residual soils from Porto. Criteria for the design of direct foundations. University of Porto. (in Portuguese)